

中国科学院大气物理研究所集刊

第 11 号

北京 325 米气象塔 的测量系统

科学出版社

中国科学院大气物理研究所集刊

第 11 号

北京 325 米气象塔的测量系统

科 学 出 版 社

1983

内 容 简 介

本专集介绍北京 325 米气象专用塔上目前已经使用的自动化遥测系统,其中包括气象塔建设过程中应考虑的若干问题、自动化遥测系统的总况、目前已经投入使用的平均场和脉动场传感器的性能以及数据处理系统等。

本专集可供环境保护部门的大气污染工作者、大专院校的大气物理专业师生以及有关科研工作者参考。

中国科学院大气物理研究所集刊

第 11 号

北京 325 米气象塔的测量系统

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1983 年 1 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

1983 年 1 月第一次印刷 印张: 4 3/4

印数: 0001—1,050 字数: 162,000

统一书号: 13031·2131

本社书号: 2910·13—15

定价: 0.80 元

前 言

根据周总理生前关于应抓紧解决污染问题，把首都建成一个清洁的城市的指示，从1974年3月开始在北京西北郊着手筹建一座高325米的气象铁塔。在有关部门的密切配合、大力支持下，经过五年多的努力，已经全部完工。气象塔遥测系统于1979年8月开始投入使用。

利用气象塔对大气边界层物理进行测量研究是一种直接和有效的方法，它具有全天候、连续、同步、精确等优点。气象塔的建成，填补了我国大气科学研究方面的一项空白，它对于弄清首都大气污染扩散规律，进而将为消除污染、造福人民发挥其应有的重要作用。

近地面一公里内的大气层与人类活动的关系十分密切。大气污染物的输送、扩散和对人类的危害主要出现在该层，通过气象塔探测和研究近地面几百米高度范围内大气中的风向、风速、温度、湿度、湍流等变化规律，对于掌握大气污染扩散规律，进而提出改善大气环境方案，有着重要的实际意义。同时也将为大气边界层物理的理论研究、军事污染、高速飞行、火箭发射、高层建筑风压和大气中声、光、电的传播以及天气预报等提供必要的科学依据。

为了使气象塔遥测系统日臻完善，除本专集介绍的测量要素外，不久还将增加湿度、垂直速度观测，今后拟再增加污染物浓度等观测，使得气象塔更好地为实现四个现代化服务。

由于我们的经验和水平有限，其中会有不少缺点和错误，希望同志们予以批评指正。

陶 诗 言

目 录

北京气象塔	洪钟祥 (1)
北京气象塔的平均场自动遥测系统	李兴生、郑达洲 (8)
梯度测风仪的物理特性	郑达洲、廖德辉、吕岁昌 (17)
温度梯度测量的误差估计	李兴生 (28)
数字测温仪	吴家麟、李锦文 (33)
数据处理系统中的程序控制采样单元	张卫华 (40)
超声风速仪	周乐义、赵翼凌、刘复军、李德新 (50)
气象塔引起测风误差的风洞实验	洪钟祥、曹冀鲁、银 铜 (60)

北 京 气 象 塔

洪 钟 祥

一、引 言

地面以上几百米的这一层大气,对于人类活动的关系十分密切。其特点是风、温、湿、压等气象要素随时间和空间的变化,要比它以上的大气层的同类气象要素的变化强烈得多,尤其在垂直方向更是如此。有时候,其变化强度较之上层可大几百倍,因此取得这一层气象要素变化的详细资料,无论是对理论研究或实际应用都是必要的。

观测大气边界层的工具是多种多样的,主要有气象塔、气艇、探空仪、飞机等直接探测方法和声雷达、激光雷达、微波辐射计、声-无线电系统等遥感探测方法。气象塔可以全天候获取边界层气象资料,并具有精确性、同时性和连续性的优点。所以从四十年代以来,英、美等国都先后开始建立气象塔。目前已有许多国家采用气象塔作为边界层大气的主要探测手段。其缺点是高度有限,不便移动。我们认为若以气象塔为基础,细致地观测一个地点的气象要素随高度和时间的变化,同时再配备便于移动的低空探空仪和声雷达等探测手段作面上的补充观测,这样便可构成一个点面结合的比较完整的边界层气象探测系统。

在北京地区建立气象铁塔的目的之一是为“首都大气污染物理规律研究”这一任务服务。因为城市大气污染主要发生在地面以上几百米的气层内,所以首先必须取得这一层大气中各种气象要素垂直结构及其随时间演变资料,以便搞清污染物在大气中迁移、扩散的规律,从而最大限度地减少污染,为改善大气环境提供必要的科学依据。当然,气象塔的观测还可在高速飞行、火箭发射、高层建筑的风压、大气中声光电波的传输和军事气象等应用方面提供资料。

建立气象塔的另一个目的是为大气边界层理论研究服务。对于地气之间动量、热量、水气的输送规律和大气湍流扩散基本规律等研究来说,气象塔的资料不仅是基础,而且亦是检验理论工作结果真伪的标准。

近年来,低层大气的遥感技术有了较快的发展,声雷达、激光雷达和微波辐射计等均已逐步投入野外使用。但是这种遥感仪器得到的大气信息往往只反应气象要素的相对变化量,它们需要利用直接探测仪器进行对比观测来加以标定。气象塔在这方面的应用是很受重视的。

北京气象塔于1974年开始建设,1979年8月投入使用。

二、塔 址 选 择

塔址选择是建设气象塔的关键问题之一,如果选择不当,塔建成后就不能获得有代表

性的资料,这将难以达到预期的目的。

如前所述,我们建立气象塔的主要目的之一,是获取大气低层的气象资料,进而研究污染物的输送、扩散规律及其对城市的影响,为老工业区的改建和新工业区的合理布局及灾害性大气污染形势的预报等提供依据。北京市的工业比较集中在郊区和远郊区,工厂排放的有害物质的扩散稀释主要在郊区进行,然后才影响城区。显然,我们应该特别注意对城市上风方气象要素的观测,因为从这个方向(指风向频率最高的方向)来的空气影响城区的机会最多;同时上风方的气象背景也是污染预报要抓的主要气象背景,只有掌握上游未经城市干扰的大气背景,才有可能预测下游未来的污染态势。从大的天气形势来说,北京上空春、秋、冬三季盛行西北风,经常影响到大气

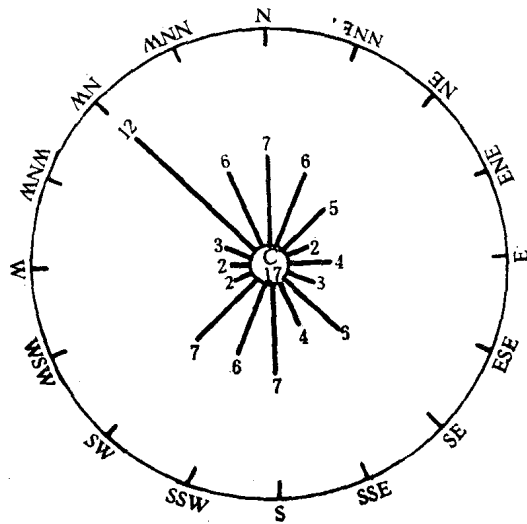


图1 北京酒仙桥累年(1961—1970)平均风频分布
(图中数字为百分数)

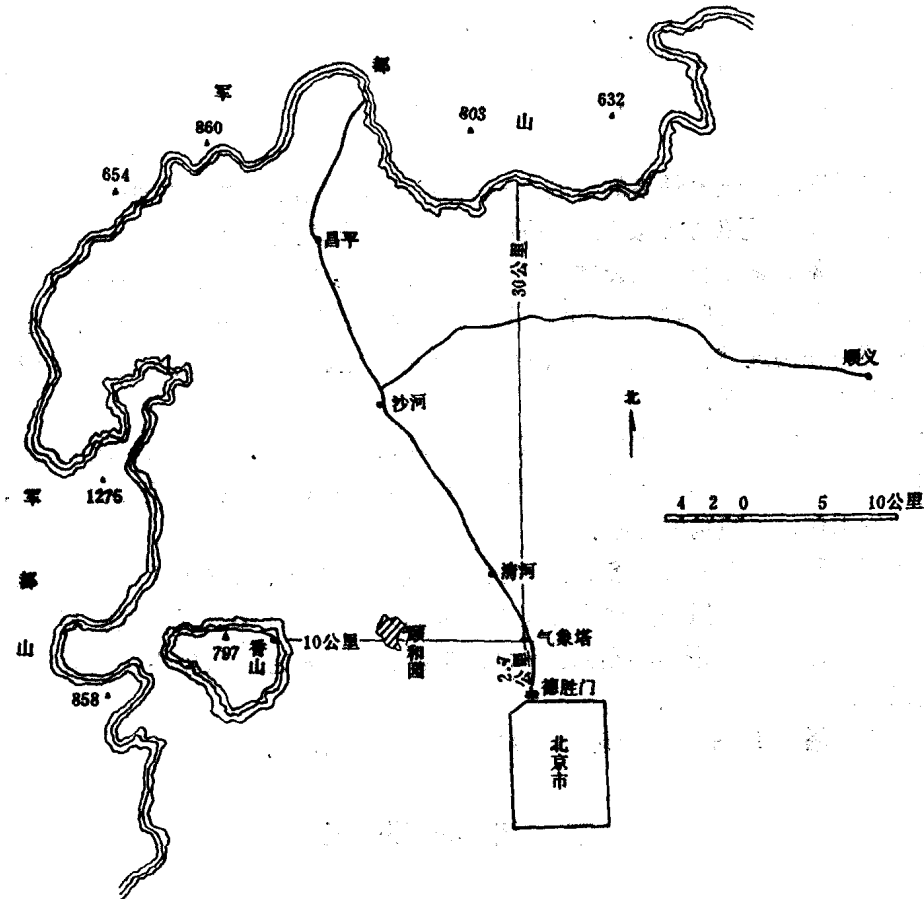


图2 气象塔塔址

低层,使得低层也经常出现西北风。同时由于北京市西部和北部为山区,不管什么季节,晴天夜间常有从山区吹向平原的偏北风。所以北京市平原地区低层大气最盛行偏北风。以酒仙桥累年(1961—1970)地面平均风资料为例,各种风向的频率分布如图1所示。可见偏北风的频率是相当高的。根据污染预报以抓上游气象条件为主的原则,在北京市将塔址选在北部市郊比较合理。

考虑到气象塔的使用要求和占地的实际可能,最后将塔址选定在德胜门外的土城上。海拔高度49米,距离德胜门约2.7公里。塔址周围的地形反映了市郊的一般特征,有农田房舍,树木小河等。半径500米范围内无高大建筑群和树林。作为气象塔系统的附属建筑,有两幢二层小楼配置于铁塔南边,离开塔基约40米。塔址周围大致地形示意于图2。

三、塔高选择

众所周知,地面附近的气象资料一般可满意地从地面气象台站获得,高空气象资料也可利用探空仪和飞机观测等方法去获取。唯有地面以上十几米到几百米这一气层的探测比较困难,利用上述方法难以得到系统、精细的资料。若建立几百米高的气象塔,则可填补这一空缺。至于塔高究竟多高为好,那要从实际需要出发,同时兼顾技术和经济上的可能性与合理性,然后作出合理选择。

从工业大气污染角度考虑,为了减轻污染程度,冶金、炼油、化工等工厂废气均向高空集中排放方向发展,烟囱愈建愈高,高度在一、二百米的已非罕见。加上排出物具有一定动量,从烟囱口排出后还要上冲相当高度(有时达百米),所以要了解污染物质的输送和扩散规律,有必要掌握三、四百米高空内气象要素的变化特征。

从理论研究角度看,国外大量观测事实表明,温度垂直分布、能量输送规律等在三、四百米气层内有较大变化。而且在稳定条件下,北京地区边界层顶的高度常常可以降低到二、三百米。因此取得这一高度层内的资料对边界层理论研究工作是特别重要的。根据需要与可能,北京气象塔的高度定为325米。

四、塔的结构

为了尽可能减少塔体对气流的阻挡,气象塔采用了通风良好的格构式结构,通风系数(指铁塔挡风截面与塔体横截面面积之比)为0.25。塔体上下具有相同的等边三角形截面,边宽为2.7米。塔身靠相隔 120° 的三组钢丝绳固定,每组五根,分别固定在三个地锚上。图3和4给出了气象塔全景照片和水平投影示意图。整个塔体由43节独立塔节组成,标准塔节的长度为7.5米,节与节之间用法兰盘螺栓连接。标准塔节的构造如图5。

为了装修仪器,塔内设有小型电梯一部,轿箱可容2—3人乘坐,载重量约200公斤,升降速度为0.38米/秒。另外,在塔内还装有爬梯,供专门人员使用。

在安装仪器的各个高度均有操作平台,平台保护栏杆高1米,平台宽0.7米,以保证登塔人员的安全。

由于铁塔很高,防雷问题必须特别加以考虑。为了安全,我们在塔基周围采用环状接

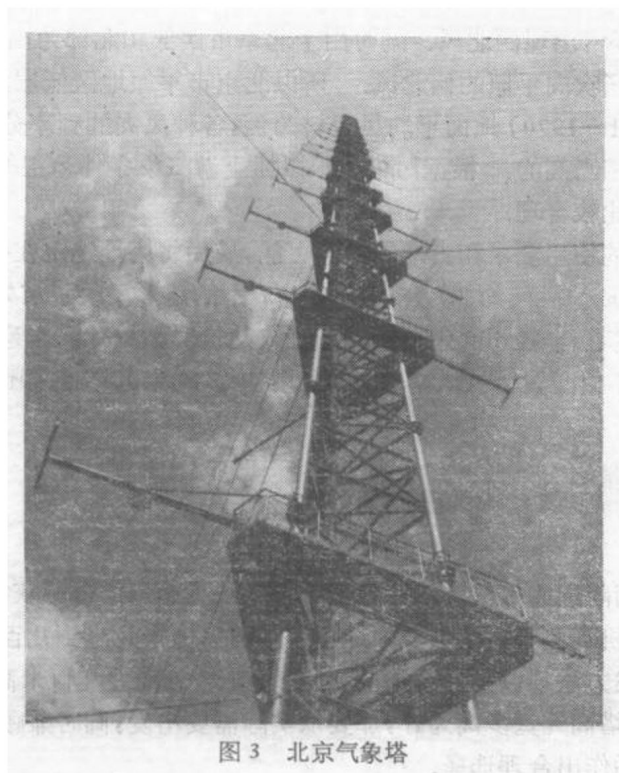


图3 北京气象塔

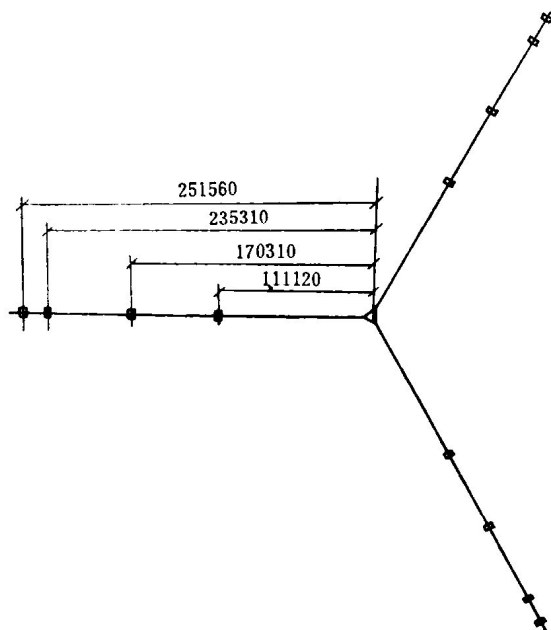


图4 气象塔平面图

地装置,三个用 40×4 镀锌扁钢做成的接地环作为水平接地体,环的直径分别为 20,40 和 60 米,地下埋设深度分别为 0.8,1.2 和 1.6 米.在八个方位引出八条辐射状扁钢,分别与三个钢环连接. 另外,在塔基附近用 8 根直径为 100 毫米的钢管打入地下作为垂直接地体 (见图 6).塔体、拉锚与地下接地环均连接在一起,接地电阻小于 0.5 欧. 经过两年雷雨季

节的考验,表明避雷效果良好可靠。

对铁塔的垂直度有较高的要求,设计提出的垂直度偏差不得超过塔高的 $1/1500$,而且最大绝对偏差不大于 60 毫米。安装后利用工程经纬仪和激光准直仪两种仪器实测的垂直度偏差小于塔高的 $1/5000$,高于设计指标。

气象塔在风力作用下的摆动情况与塔体的结构和刚度有关。根据理论计算,塔体自

振的基本周期约为 3 秒,在 10 级大风时,塔顶自由端理论最大摆幅为 1.2 米。经实测,在 2,3 级风时,塔顶摆幅约为 2,3 厘米;6,7 级风时的摆幅约为 10 厘米。因此可以肯定该塔实际摆幅要比理论预计值小得多。

值得指出,当铁塔安装完毕后曾出

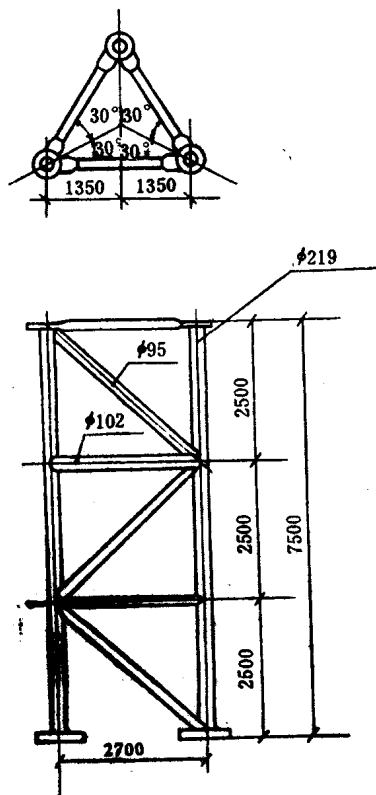


图 5 塔节结构

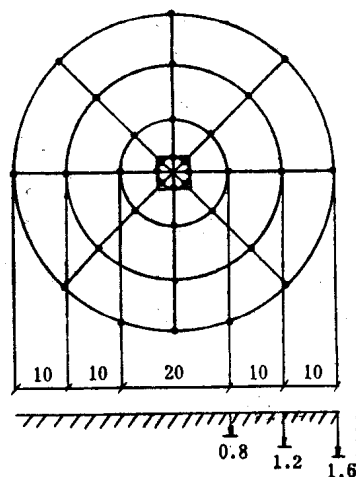


图 6 接地网

现了振动现象。这种振动一般发生在夜间大气比较稳定,风速又不太大(2,3 级以下)的条件下。发振时从平台和爬梯等部分发出金属敲击声,每次持续时间从几分钟到 1,2 个小时不等。经测试,振动时的主要频率在 10 赫左右,垂直振幅约几微米,水平振幅约几十微米。产生振动的原因可能是,在稳定的流场中,由于气流绕过圆柱形的钢丝绳,在绳子的背风面产生“卡门涡迹”,随着卡门涡的有规则的不断脱落和新生,在钢丝绳的背风面造成了压力起伏而使钢丝绳发生振动,当几个方向的钢丝绳的振动合拍而又有足够大的能量时,便牵动塔体振动并发出响声。

尽管铁塔振动时风荷载很小,振动处在低应力作用状态下,对铁塔的安全不至有大的影响,但从长远考虑,使这种振动减小到最低限度仍然是必要的。目前各有关单位正在开展减振方面的实验研究,并证明在钢丝绳上安装特制的减振器后,振动已大大减弱,响声消除。由此得出一条经验:在建设拉线式高塔时,钢丝绳引起的塔体振动问题应该考虑,这只要在结构设计时采取一定的措施便不难解决。

五、塔体对测风的影响

在气象塔上安装感应器测风，必须认真考虑塔体阻挡气流所造成的测量误差。在塔的下风方，由于结构的障碍作用而产生的乱流将使风速明显减小，但随着离开塔的距离的增加，这种风速减小现象慢慢减弱。而在塔的两侧附近，由于绕流造成的增速效应将使风速测量值偏高。所以气象塔上的测风仪器总是安装在横臂上，使得仪器伸离塔体有足够的距离，以减小障碍影响确保测量精度。

对于北京气象塔来说，主要挡风面是外径为 219 毫米的圆柱形塔柱。圆柱位势绕流问题的求解可采用现成的理论，风速受圆柱障碍物影响的程度可用下式估计：

$$u/u_{\infty} = 1 - \left(\frac{a}{x}\right)^2$$

其中 u_{∞} 是远离塔体未受其影响处的自由气流速度在 x 方向的分量， a 是圆柱体半径， u 是距离 x 处的实测风速。

因此，为了使测量误差在 1% 以下，伸臂长度 x (测量点到圆柱中心距离) 应比塔柱半径大 10 倍以上。这是对完全孤立的一个圆柱障碍物而言，实际情况要复杂得多，只单纯考虑铁塔一根立柱影响是不够的，还应综合考虑塔体横截面整体 (包括平台、爬梯和电梯导轨等所有挡风体) 对气流的阻挡，这就使得理论分析十分困难，因此只能依靠风洞实验和野外对比观测来确定理想的伸臂长度。当时，我们参照了国外的一些实验结果，采用双伸臂安装方式进行设计，即在彼此相隔 180° 的两个相反方向各装一台测风仪，使得不管

风向如何，总保证有一套仪器是处于上风方的半圆内。而且确定伸臂的长度为塔的边宽的 1.5 倍。这样便使因塔体障碍所造成的测风误差控制在 5% 左右。最近，我们通过风洞模型实验证明这种考虑是正确的。

根据北京气象塔的具体结构和本地常年风频分布，我们分别在西北和东南两个盛行风向安装一对伸臂，臂端离开塔柱边缘约 4.1 米。

为了详细地观测气象要素的垂直结构，铁塔共分 15 个层次设置仪器，分层原则是下面 5 层基本上按对数律分层，80—200 米之间按 20 米间隔分层，200—320 米之间按 40 米间隔分层。各层高度，伸臂指向和各层现有仪器如图 7 所示。这些仪器是：测量平均风廓线的水平风向风速仪 (V, d)，测量温度层结的温差仪 (ΔT)，测量风速脉动的超声

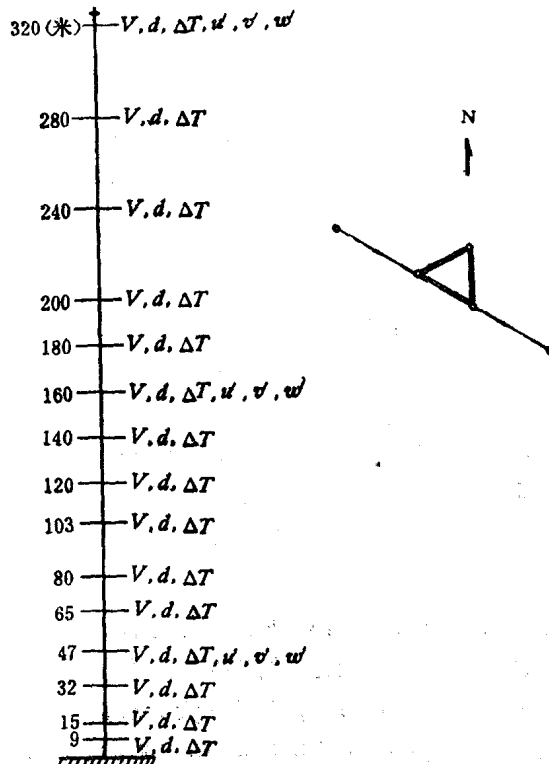


图 7 气象塔分层

风速仪 (u' , v' , w'), 和测量地面温度的绝对温度仪 (T). 所有塔上仪器感应到的讯息均通过电缆传输到机房, 然后分成两路, 一路送至记录器以廓线形式作直观记录, 另一路送至计算机进行数据处理.

北京气象塔的平均场自动遥测系统*

李兴生 郑达洲**

提 要

本文介绍用于 325 米气象塔上进行平均场垂直梯度测量的自动化设备：其中包括各层安装的风速、风向、温差以及地面温度等感应器的性能以及二种资料自动化处理系统的功能。

一、引 言

利用气象塔^[1-3]或其它现成铁塔^[4-5]对大气边界层进行测量研究是一种比较直接而精度较高的方法，它具有连续性、全天候、多用途和同时性好等优点。经常用它来研究大气边界层的湍流特征、边界层结构和扩散规律。在军事上用来研究低层爆炸波的传播及预报、核火箭试验的扩散预报、地下核试验以及特殊沉降物和悬浮物的影响。国外还利用塔对强风暴的低层结构及其演变规律进行了长期的观测和研究。除此而外，随着工业和科学技术的发展，日益增加的高大建筑物迫切需要详细的特别是高度较高的风压资料。铁塔作为一个直接探测的工具，还被广泛用作间接探测的对比依据。

用铁塔进行垂直梯度观测时，要求塔上测量仪器的精度较高；另外多要素的垂直梯度测量必将连续输出大量数据，因此数据处理和记录系统的自动化是非常必要的。我们将测量到的平均场数据通过讯号电缆传送到两种数据处理系统：一种是通过自动程序控制采样装置将测量讯号以廓线形式分别记录在几台自动平衡电子电位差计上；另外一种是由巡回检测、模数转换装置将测量讯号以瞬时量直接输入 DJS-130 小型快速电子计算机进行处理。

二、观测塔概况

325 米气象塔（见本刊上篇文章图 3）风向、风速、温差等感应器安装在离地面 8.0, 15.0, 32.0, 47.0, 65.0, 80.0, 103.0, 120.0, 140.0, 160.0, 180.0, 200.0, 240.0, 280.0 以及 320.0 米等十五层高度从塔身伸出来的活动伸臂上，为了减小和克服气流通过塔体造成的绕流对测风感应器的影响，塔体模型在风洞里进行了实验，风洞实验表明^[6]：气流受塔体的影响并且与测风感应器距塔体的位置有密切的关系（图 1），当风感应器距塔体的距离是塔体边长的二分之一和一倍时，塔体下风方造成的尾流角在 70° 左右，尾流区风速减小 50% 左右，塔体两侧风的加大值可增加 10%，最大达 20%。当风感应器距塔体的距离是塔体边长的一倍半和二倍时，塔体下风方造成的尾流角在 50° 以内，尾流区风速减小 30%

* 上海气象仪器厂参加部分协作。

** 参加工作的同志还有吴家麟、朱晋剑、张卫华、郑淑珍等。

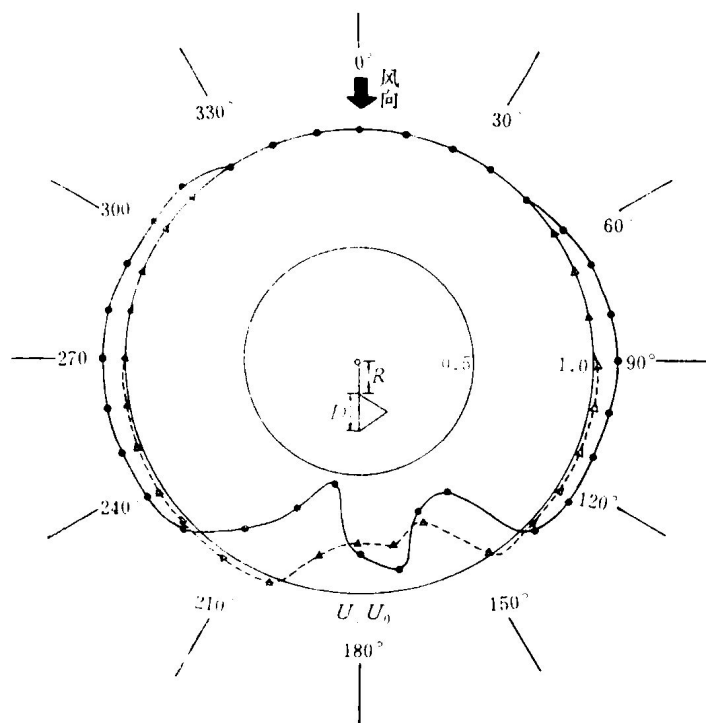


图1 塔体对风速测量的影响

图中 D 为塔的边宽, R 为感应器离塔体的距离; U_0 为未受塔体影响的风速, U 为实测风速;
 — $R = 0.5D$, --- $R = 1.5D$

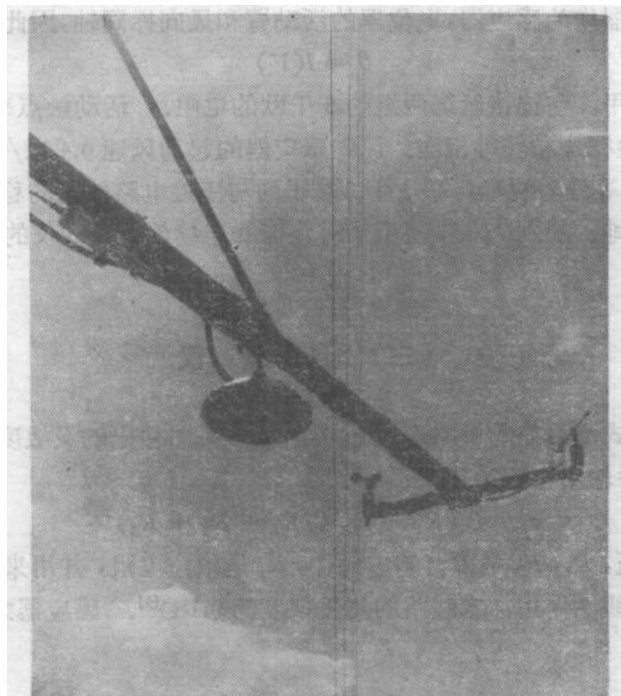


图2 风向、风速、温差感应器外形及其在伸臂上的架设位置

左右,塔体对来流 180° 圆弧内的风速无明显影响,另外 180° 圆弧上最大风速增量约 5%。因此本测量塔的每一层设有二个活动伸臂,每个伸臂长 4 米,位于西北、东南方向,一致于

北京常年气候统计的最多风向。在地面上还有一台绝对温度测量仪及温差仪。

风向、风速、温差等感应器在伸臂上的架设位置见图 2。

三、感应器性能

(一) 风 速 仪

采用小型三风杯式感应器,起动风速 0.4 米/秒,测量范围 0.4—50 米/秒,测量精度为 $\pm(0.2+0.02 \times \text{实际风速})$ 。风杯和一个发讯盘同轴,发讯盘的外沿开有等距离的 24 个齿口,盘两侧装有光源及光电二极管。当风杯随风转动时,发讯盘随之转动,光源和光电二极管之间的光路断续导通,每转一周,光路通断 24 次,形成 24 个光脉冲,单位时间内的脉冲数与风杯的转速成正比例,即风速越大,脉冲的重复频率越高。

光脉冲通过光电二极管和射极耦合触发器转变为矩形波,然后经电缆输出。

风速变换器输出的脉冲经电缆送至频率电压转换电路。该电路包括射极耦合触发器、限幅器及泵电路。射极耦合触发器的作用是把经过电缆传输后畸变了脉冲整形。由于输入泵电路的脉冲幅度要求稳定,所以在泵电路前设置一级限幅器,泵电路是本变换器的核心部分,起频压转换作用,且线性好。风速仪的物理特性以及电路性能见本刊文七。

(二) 风 向 仪

用特制的电位器作为感应器,电位器的活动臂和风向标同轴,因此风向用电位表示:

$$\theta = f(V) \quad (1)$$

在胶木圆环上用漆包镍铬丝绕两组约 5 千欧的电阻。活动触点采用 $\phi 0.8$ 毫米左右的五元合金,用弹性铜片和转轴相连。风向感应器的起动风速 0.4 米/秒,误差 $< \pm 5^\circ$ 。

360° 的电位器等分为两半,每一开口端子均与压控电路控制的稳压源相连,由此风向方位的测量连续地扩展到 720° ,使记录有较佳的连续性。风向仪的物理性能以及电路性能见文献[7]。

(三) 温 差 仪

这里采用差动式测温差的桥路形式^[9],为了提高桥路输出的灵敏度,四个桥臂都接上感应元件,这时电桥输出电压为

$$e = E_i(R_1 - R_2)(2R_i + R_1 + R_2)^{-1} \quad (2)$$

其中 E_i 是电源电压, R_1, R_2 是桥臂感应元件, R_i 是限流电阻,并用来改善不平衡电桥在宽量程情况下的非线性作用。本线路的测量精度为 $0.1^\circ\text{C}^{[10]}$ 。感应器之间采用八线补偿(见文献[8])。

(四) 地 面 温 度 仪

采用平衡电桥测温原理,由感应器、控制电路、数码显示和打印机等组成^[10],测量范围

从 $-35-+45^{\circ}\text{C}$, 测量精度 $\leq 0.3^{\circ}\text{C}$. 考虑到引线电阻随温度的变化, 同温差一样采取了三线补偿办法.

四、讯号自动检查和检测

风速、风向、温差等感应器分别安装在十五层高度上, 每层有五道输出讯号, 包括地面温度在内, 共计有 76 道输出讯号, 这些讯号除要求同时性外, 主要要求正确可靠. 本系统对风速、风向、温差通风机备有自动检查装置.

各感应器和数据处理系统之间用多芯绞合屏蔽电缆连接, 有较好的抗干扰能力.

十五路风速讯号从感应器至数据处理系统, 首先通过检测转换干簧继电器(图 3), 利用它断开各路感应器, 并将各路频压转换线路接到检测振荡器上, 依次检查各路的工作状况, 调整输出的一致性, 进行精度校正等. 借助风速面板上的十五个无锁检查按键 K 及电流表 M , 可以察看每个通道的情况. 利用此检查装置很容易把感应器和测量线路的毛病区分开来, 也很容易检查出有故障的通道.

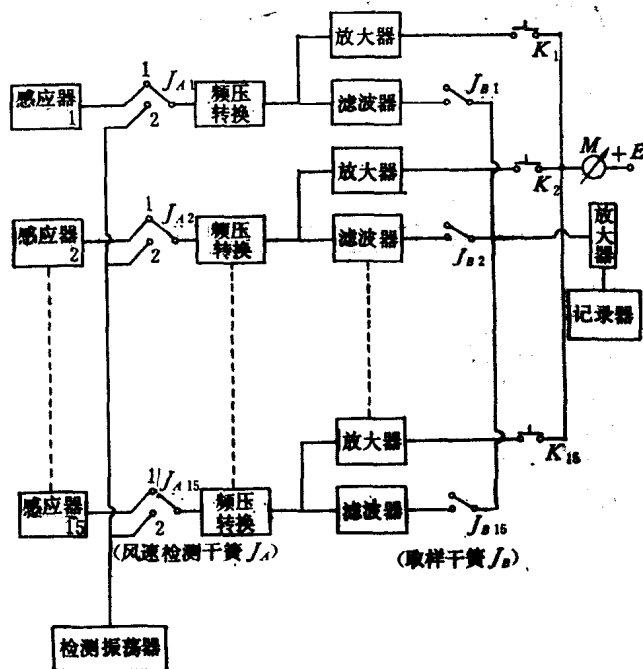


图 3 风速自检框图

十五路来自感应器的风速讯号经过检测干簧继电器接到相应的十五个频压转换电路, 然后从相应的十五个隔离放大器输出, 送到计算机处理系统中去; 十五路讯号由另一路经阻容滤波器平滑使讯号在某一采样时间内同步, 然后送入自动程序控制采样器按一定次序采样, 这就把十五个通道简化为单通道, 由此只需用一个隔离放大器和一个模拟记录器就可以把 320 米的风廓线记录下来.

风向电位器分三路输出输入: 一路作为压控器的输入, 使电位器上的电位分布满足扩展量程的要求. 压控器前面的隔离级是一源极跟随器, 有很高的输入阻抗, 以防止压控

器对其他两路的影响,保证了测量精度。隔离级前面的容阻滤波器起抗干扰作用,避免由于一些脉冲干扰使压控器误动作。第二路经隔离放大器以瞬时量形式输入电子计算机处理系统。第三路经 RC 滤波器滤去高频部分,使讯号在某一采样时间内同步,然后送入自动程序控制采样器中,经采样后的十五路风向进入公用隔离放大器,最后由自动平衡电子电位差计描绘出风向廓线来。风向检查和检测框图示于图 4。

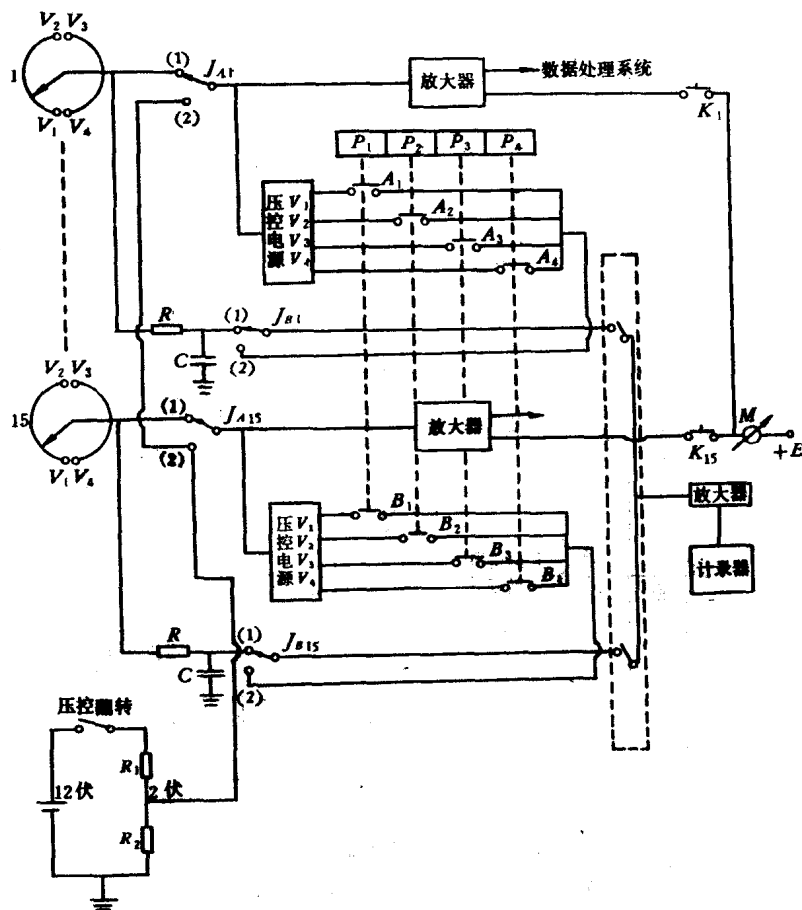


图 4 风向自检框图

风向电位器上的电位要求精确。从零度到 720 度范围内,电位器四个端子上的电位都要变换一次,也就是说,必须时刻保证八个电位的精确性。十五层风向电位器共有 120 个电位,只有自动化测量才能达到迅速准确的要求。为了节省设备,简化线路,利用数据处理系统中的自动程序控制采样器以及自动平衡电子电位差计,再附加一些干簧继电器来构成风向检查装置。当按下风向检测按键时, J_A 和 J_B 干簧均动作, J_A 接端子 (2),从而使放大器及压控电源的输入端经 R_2 接地,也即零电位。 J_B 接端子 (2),就把经由四个 15 刀单掷互锁式按键开关 P 选择得的压控电源送到程序控制采样器。当按下 P_1 键时,十五路压控电源的 V_1 接到采样器,按下 P_2 ,则十五路压控电源的 V_2 送往采样器,因此分别按下 P_1-P_4 ,便可检测 V_1-V_4 。由于采样器把十五个相同的电位送入记录器中,因此,